

基于线性变系数差分方程的运动 目标检测方法

熊 艳 彭嘉雄 丁明跃

(华中理工大学图象所 武汉 430074)

薛 东 辉

(华中理工大学电信系 武汉 430074)

摘 要

将 RMTI 方法所限定的目标运动模型扩展到匀加速运动的情况,提出了一种基于线性变系数差分方程的运动弱目标检测方法,并分析了其信噪比增益与背景噪声的时间相关系数、空间相关矢量之间的关系。实验结果表明该方法能有效地提高对低信噪比条件下匀加速运动目标的检测能力。

关键词: 运动目标检测,线性变系数差分方程,时间相关系数,空间相关矢量。

1 引言

Reed 等人^[1,2]于 1983 年提出的 3D 匹配滤波方法是检测低信噪比条件下匀速直线运动目标的一种有效方法,接着,他们又于 1990 年提出了一种递推的运动弱目标检测方法(RMTI),该方法由于采用递推形式,仅需计算和存贮 2D 而不是 3D 付氏变换数据,从而减少了运算量并节省了存贮空间。

本文将 RMTI 方法所限定的目标运动模型扩展到匀加速运动的情况,提出了一种基于线性变系数差分方程的运动目标检测方法,并分析了其信噪比增益与背景噪声的时间相关系数、空间相关矢量之间的关系。实验结果表明该方法能有效地提高对低信噪比条件下匀加速运动目标的检测能力。

2 方法的导出

设 $y_n(\mathbf{r})$, ($1 \leq n \leq N$), 为第 n 时刻的 2D 图象数据,其中矢量 \mathbf{r} 表示 2D 空间上

的一点。用目标和背景的形式表示该序列为

$$y_n(\mathbf{r}) = s_n(\mathbf{r}) + m_n(\mathbf{r}), \quad (1)$$

其中 $s_n(\mathbf{r})$, $m_n(\mathbf{r})$ 分别表示第 n 时刻目标和背景的亮度分布。

假定一亮度不变的目标以初速度 \mathbf{v}_0 , 加速度 \mathbf{a} 作匀加速直线运动, 即

$$s_n(\mathbf{r}) = s_0\left(\mathbf{r} - n\mathbf{v}_0 - \frac{n^2}{2}\mathbf{a}\right), \quad (2)$$

其中 $s_0(\mathbf{r})$ 表示目标的初始 2D 空间亮度分布。将 (2) 式代入 (1) 式并对其进行 2D 付氏变换得

$$Y_n(\mathbf{k}) = S_0(\mathbf{k}) \exp\left\{-i\mathbf{k}\left(n\mathbf{v}_0 + \frac{n^2}{2}\mathbf{a}\right)\right\} + M_n(\mathbf{k}), \quad (3)$$

其中 \mathbf{k} 表示 2D 空间的频率矢量。

由 (3) 式可看出, 序列中相邻两帧的目标部分所对应的付氏变换之间仅相差一个相位偏移量,

$$\alpha_n(\mathbf{k}) = \frac{Y_n(\mathbf{k})}{Y_{n-1}(\mathbf{k})} = \exp\left\{-i\mathbf{k}\left(\mathbf{v}_0 + \left(n - \frac{1}{2}\right)\mathbf{a}\right)\right\}. \quad (4)$$

我们知道, RMTI 方法的实质就是沿目标运动轨迹积累信号能量, 因此只要逐帧补偿上述的相位偏移量, 目标信号的能量就能得到一致的积累。故若将 RMTI 方法所限定的目标运动模型扩展到匀加速运动的情况, 只需将其对应的线性常系数差分方程修正为线性变系数差分方程,

$$X_n(\mathbf{k}) = Y_n(\mathbf{k}) + X_{n-1}(\mathbf{k})\alpha_n(\mathbf{k}). \quad (5)$$

进而, 对 $X_n(\mathbf{k})$ 进行 2D 匹配滤波, 并对匹配滤波的结果进行逆付氏变换。即得第 n 帧图象的处理结果。

可以看出, RMTI 方法事实上是本文所述方法, 当 $\mathbf{a} = 0$ 时的一种特例。

3 性能分析

由 (5) 式可以导出

$$X_n(\mathbf{k}) = \sum_{j=0}^n Y_{n-j}(\mathbf{k}) \exp\left\{-i\mathbf{k}\left[j\mathbf{v}_0 + \left(jn - \frac{j^2}{2}\right)\mathbf{a}\right]\right\}. \quad (6)$$

将 (3) 式代入 (6) 式可得

$$\begin{aligned} X_n(\mathbf{k}) &= (N+1)S_0(\mathbf{k}) \exp\left\{-i\mathbf{k}\left(n\mathbf{v}_0 + \frac{n^2}{2}\mathbf{a}\right)\right\} \\ &+ \sum_{j=0}^n M_{n-j}(\mathbf{k}) \exp\left\{-i\mathbf{k}\left(j\mathbf{v}_0 + \left(jn - \frac{j^2}{2}\right)\mathbf{a}\right)\right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

其对应的目标信号为

$$x_s(\mathbf{r}) = (N + 1)s_0 \left(\mathbf{r} - n\mathbf{v}_0 - \frac{n^2}{2} \mathbf{a} \right). \quad (8)$$

假设输入噪声为均值为零的平稳过程, 则其对应的背景噪声的方差为

$$\begin{aligned} \text{var} &= E \left[\sum_{j=0}^n m_{n-j} \left(\mathbf{r} - \left(j\mathbf{v}_0 + \left(jn - \frac{j^2}{2} \right) \mathbf{a} \right) \right) \right]^2 \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{j'=0}^n E \left[m_{n-j} \left(\mathbf{r} - \left(j\mathbf{v}_0 + \left(jn - \frac{j^2}{2} \right) \mathbf{a} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot m_{n-j'} \left(\mathbf{r} - \left(j'\mathbf{v}_0 + \left(j'n - \frac{j'^2}{2} \right) \mathbf{a} \right) \right) \right] \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{j'=0}^n B \left(j - j', (j - j')\mathbf{v}_0 + \left(jn - j'n + \frac{j^2 - j'^2}{2} \right) \mathbf{a} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $B(\cdot)$ 为输入背景噪声的自协方差函数。故 $x_n(\mathbf{r})$ 对应的背景噪声的方差与输入背景噪声的方差 σ^2 , 时间相关系数 ρ_t , 空间相关矢量 ρ_r 三个因素有关。且有

$$(n + 1)\sigma^2 \leq \text{var} \leq (n + 1)^2\sigma^2 \quad (10)$$

成立。

由(8)式和(9)式可得, 当 $\rho_t = 0$ 或 $\rho_r = 0$ 时, $x_n(\mathbf{r})$ 的信噪比为

$$\text{snr}_{i_n} + 10 \lg(n + 1) \text{db}$$

其中 snr_{i_n} 为输入图象的信噪比。继续对 $X_n(\mathbf{k})$ 进行 2D 匹配滤波, 并对匹配滤波的结果进行逆付氏变换即得输出的第 n 帧图象, 其信噪比为

$$\text{snr}_{o_{n_i}}(n) = \text{snr}_{i_n} + 10 \lg(n + 1) + \Delta \text{snr}_{m_f}, \quad (11)$$

其中, Δsnr_{m_f} 为 2D 匹配滤波器所对应的信噪比增益。进一步, 可导出

$$\text{snr}_{o_{n_i}}(n) = \text{snr}_{o_{n_i}}(0) + 10 \lg(n + 1). \quad (12)$$

当 $\rho_t > 0$ 或 $|\rho_r| > 0$ 时, 可导出

$$\text{snr}_{o_{n_i}}(0) \leq \text{snr}_{o_{n_i}}(n) < \text{snr}_{o_{n_i}}(0) + 10 \lg(n + 1) \quad (13)$$

4 实验结果

让一目标 (5×5) 以 $\mathbf{v} = (1, 0)^T$, $\mathbf{a} = (1, 0)^T$ 运动, 分别模拟生成了两组信噪比为 5db 的图象序列 $(128 \times 128 \times 10)$, 其中模拟噪声为高斯白噪声。其中: 第 1 组, $\rho_t = 0$, 采用 LVCDE 算法得到的输出图象相对于 $\text{snr}_{o_{n_i}}(0)$ 的信噪比增益如图 1 中模拟值 1 所示; 第 2 组, $\rho_t = 1$, $\rho_r = (0, 0)^T$, 结果如图 1 中模拟值 2 所示。

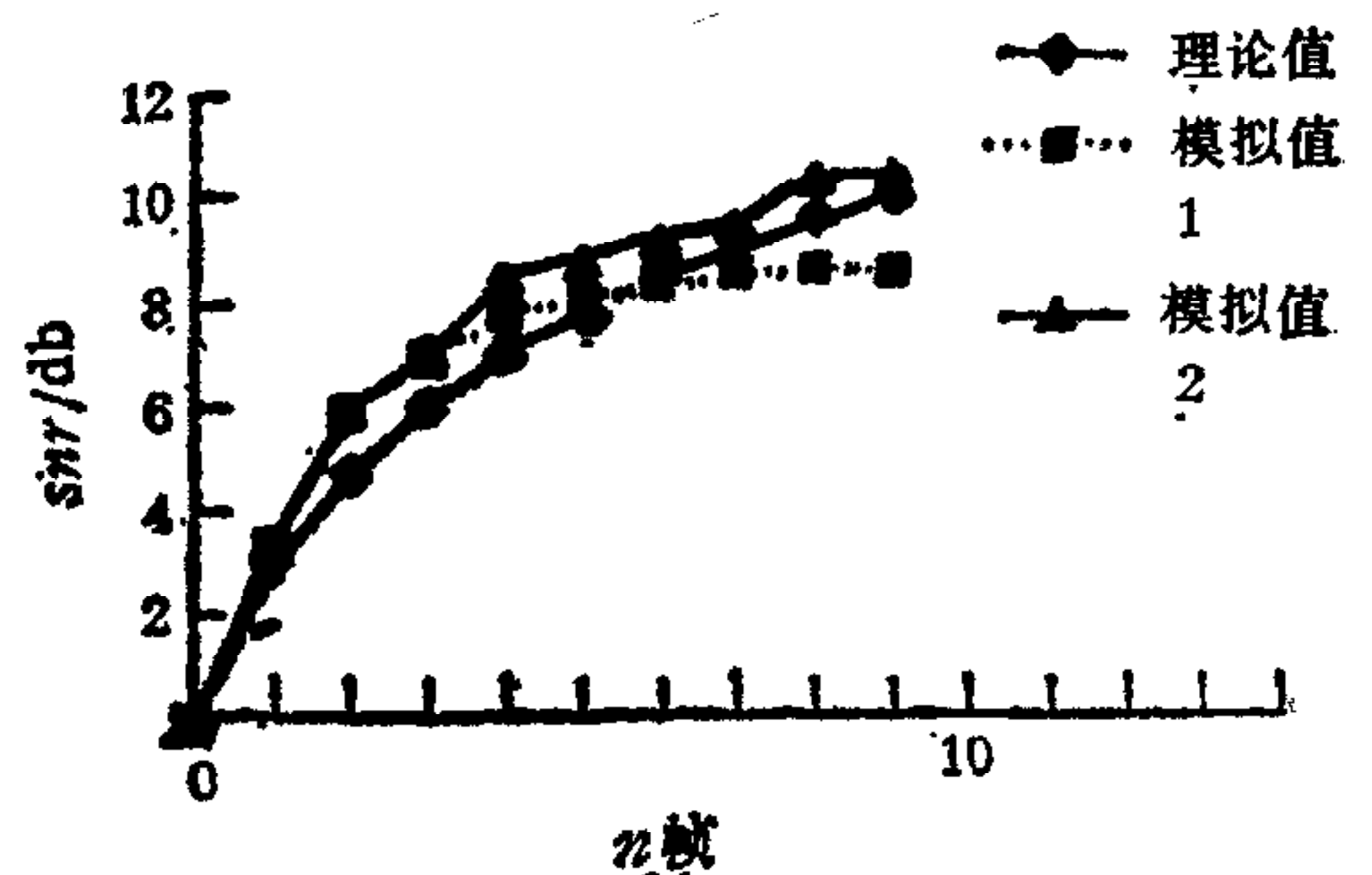


图 1 信噪比增益的理论值与实验值

参 考 文 献

- [1] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B. Application of three-dimensional filtering to moving target detection. *IEEE Trans.* 1983, **AES-19** (6): 898—905.
- [2] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences. *IEEE Trans.*, 1990, **AES-26** (3):434—439.

A METHOD BASED ON LINEAR-VARIANT-COEFFICIENT-DIFFERENCE-EQUATION FOR MOVING TARGET IDENTIFICATION

XIONG YAN PENG JIAXIONG DING MINGYUE

(*Inst. of Pattern Recognition & AI, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074*)

XUE DONGHUI

(*Dept. of Electronics & Information Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074*)

ABSTRACT

The moving model of target limited by RMTI method is extended to the movement with constant accelerate in this paper. A method based on linear-variant-coefficient-difference-equation for moving target indication is presented. And then we analyse the relationship between its snr gain and the temporal correlation coefficient, spacial correlation vector of the background clutter. Experimental results have shown it can improve the detectability of moving target with constant acceleration under the low snr condition effectively.

Key words: Moving target indication, linear-variant-coefficient-difference-equation, temporal correlation coefficient, spatial correlation vector.